Тихонов Сергей Александрович, аспирант
Научный руководитель: Бартоломей Петр Иванович, проф., д-р техн. наук
Научный консультант Паниковская Татьяна Юрьевна, доц., канд. техн. наук

АЛГОРИТМ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА УЗЛОВЫЕ ЦЕНЫ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Введение конкурентных отношений в электроэнергетической отрасли выдвигает новые требования к математическим инструментам и алгоритмам. Появляются новые переменные, по которым судят об эффективности и объективности предложенного математического описания. Такой новой переменной в рынке электроэнергии является узловая цена.

Часто в узловой цене выделяют несколько составляющих, одна из которых связана со специфической особенностью ЭЭС – наличием технических потерь при доставке электроэнергии потребителю. Эта составляющая называется маржинальной ценой потерь. Маржинальную цену потерь можно оценить, вычислив градиент функции потерь. Значение каждого из элементов функции соответствует величине относительного прироста потерь для узла.

Представим технические потери как алгебраическую сумму потоков по всем связям i-j, что соответствует выражению (1);

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} P_{ij}, \tag{1}$$

где P_{ij} – поток мощности из узла i в сторону узла j по связи i-j.

Относительный прирост потерь для произвольного узла k определяется согласно выражению (2):

$$\sigma_k = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} \frac{\partial P_{ij}}{\partial P_i} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} \sigma_k^{ij}, \tag{2}$$

где σ_k^{ij} – относительный прирост потока активной мощности, вытекающего из узла i в сторону узла j по связи i-j, а выражение в скобках под знаком суммы - относительный прирост потерь в ветви между узлами i и j для узла k.

Учитывая, что P_{ij} имеет сложную зависимость от значений углов $\bar{\delta}$ и величин напряжений узлов $\bar{V}$, воспользуемся разложением производной сложной функции на частные производные (3),

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial P_k} = \sum_{t=1}^{N}\left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_t}\cdot\frac{\partial \delta_t}{\partial P_k} + \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_t}\cdot\frac{\partial V_t}{\partial P_k}\right). \tag{3}$$

Таким образом, первые составляющие произведений ($\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_t}$ и $\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_t}$) можно определить, зная выражение для потока по ветви и параметры режима ($\bar{\delta}$ и $\bar{V}$). Составим из этих величин матрицу, в которой строки соответствуют потокам между ветвями i-j, а столбцы - производным по $\bar{\delta}$ и $\bar{V}$:

$$\left(\frac{\partial P_{ij}}{\partial \delta_t}\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_t}\right) \tag{4}$$

Оставшиеся слагаемые объединим в вектор (5):

$$\left(\frac{\partial \delta_t}{\partial P_k}\ \frac{\partial V_t}{\partial P_k}\right)^T. \tag{5}$$

Элементы этого вектора определяются из уравнений узловых напряжений путем дифференцирования левой и правой части уравнений (6)

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial \delta_t}{\partial P_k} \\ \frac{\partial V_t}{\partial P_k} \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial P_k} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial P_k} \end{pmatrix}. \tag{6}$$

Дифференцирование правой части уравнений по P_k приведет к тому, что в результирующем векторе (после дифференцирования) только один элемент $\frac{\partial \Delta P_k}{\partial P_k}$ будет равен единице, а остальные – нулю. В итоге, из решения системы уравнений (6) нетрудно заметить, что искомый вектор является i-м столбцом обратной матрицы Якоби;

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \delta_t}{\partial P_k} \\ \frac{\partial V_t}{\partial P_k} \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial P_k} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial P_k} \end{pmatrix}. \tag{7}$$

В результате перемножения матрицы (5) на вектор (6) имеем вектор $\sigma_i^{\backslash}$, элементы которого - относительные приросты потоков по связи i-j для k-го узла

$$\sigma_k^{\backslash} = \begin{pmatrix} \sigma_k^{12} \\ \sigma_k^{21} \\ \dots \\ \sigma_k^{ij} \end{pmatrix}.$$

Сумма двух первых элементов вектора $\sigma_k^{\backslash}$ $\sigma_k^{12} + \sigma_k^{21}$ – относительный прирост потерь по связи между узлами 1 и 2 по P_i. Относительный прирост потерь для k-го узла σ_k равняется сумме всех элементов вектора $\sigma_k^{\backslash}$.

Достоинством данного алгоритма является полный учет влияния значений напряжений и углов на технические потери и определение для каждого узла компоненты узловой цены, связанной с учетом потерь. Дополнительно следует отметить, что матрица (7) может быть использована при определении другой компоненты узловой цены – стоимости перегрузки.